第31卷 第3期
2017年3月
材料研究学报
CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH
Vol. 31 No. 3
Mar. 2017

两种马来酸酐接枝物对膨胀阻燃聚丙烯增韧共混复合体系性能的影响

金 静[1] 王 昊[2] 舒中俊[1] 卢林刚[3]

1 中国人民武装警察部队学院消防工程系 廊坊 065000
2 中国人民武装警察部队学院研究生队 廊坊 065000
3 中国人民武装警察部队学院科研部 廊坊 065000

摘 要 用膨胀型阻燃剂(IFR)和乙烯辛烯共聚物(POE)对聚丙烯(iPP)进行阻燃和增韧改性，比较研究了两种典型增容剂聚丙烯接枝马来酸酐(PP-g-MAH)和乙烯辛烯共聚物接枝马来酸酐(POE-g-MAH)对膨胀阻燃增韧共混复合体系阻燃性能以及力学性能的影响。结果表明：IFR可提高聚丙烯共混物的燃烧性能，但是明显降低材料的力学性能，而增容剂的加入可同时提高复合材料的燃烧性能和力学性能。PP-g-MAH使IFR的分散更均匀，添加1%(质量分数，下同)的PP-g-MAH使复合材料的平均热释放速率、热释放速率峰值、比消光面积平均值以及烟释放总量比未添加增容剂的阻燃材料分别下降24%、30%、56%和46%；而POE-g-MAH能使复合材料形成包覆结构，使其冲击强度明显提高，加入5%的POE-g-MAH可使复合材料冲击强度提高93%。

关键词 复合材料，阻燃性能与力学性能，共混复合，增容剂

中图分类号 TQ325.1+4 **文章编号** 1005-3093(2017)03-0219-07

Effect of Two Maleic Anhydride Grafted Polymers as Modifier on Intumescent Flame Retardancy and Mechanical Property of Polypropylene Based Composites

JIN Jing[1], WANG Hao[2], SHU Zhongjun[1], LU Lingang[3]

1 Department of Fire Protection Engineering, Chinese People's Armed Police Forces Academy, Langfang 065000, China

2 Graduates College, Chinese People's Armed Police Forces Academy, Langfang 065000, China

3 Department of Science and Technology, Chinese People's Armed Police Forces Academy, Langfang 065000, China

Correspondent: JIN Jing, Tel: (0316)2068526, E-mail: jinj@iccas.ac.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 21472241), Beijing National Laboratory for Molecular Sciences (No. 2013015) and Natural Science Foundation of Hebei Province (No. B2015507044)

Manuscript received 2016-06-07; in revised form 2016-09-27

ABSTRACT To improve the flame retardancy and mechanical properties of iso-polypropylene (iPP), composites of iPP/poly(ethylene-co-octene)/intumescent flame retardant (iPP/POE/IFR),were prepared by melt-extrusion process with a twin-screw extruder. And then their flame retardancy and mechanical properties were investigated systematically. Particularly, the effect of two typical compatibilizers, i.e. maleic anhydride grafted polymers of POE-g-MAH and PP-g-MAH, on the properties of the composites was

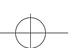
资助项目 国家自然科学基金(21472241)、北京分子科学国家实验室开放课题(2013015)及河北省自然科学基金(B2015507044)

收稿日期 2016-06-07 **定稿日期** 2016-09-27

作者简介 金 静，女，1986年生，博士，讲师

通讯作者 金 静，jinj@iccas.ac.cn，研究方向为聚合物阻燃

DOI 10.11901/1005.3093.2016.318



examined in detail. The results show that IFR is efficient for improving the flame retardancy of the iPP blend, while harmful to their mechanical properties. By comparing with the composite without compatibilizer, the addition of 1%(mass fraction) compatibilizer can improve significantly the flame retardency and mechanical properties for the composites. Furthermore, pp-g-MAH is more effective in improving the flame retardency, while POE-g-MAH is preferable to enhance the mechanical properties. The optimized comprehensive properties are resulted from the fine dispersion of the intumescent flame retardant.

KEY WORDS composite, flame retardant and mechanical properties, blending and composites, compatibilizer

聚丙烯(PP)是一种综合性能良好的通用高分子材料。但是，PP易燃烧，氧指数较低(17-18)且燃烧时发热量大，容易产生大量熔滴，应用时需添加阻燃剂。膨胀型阻燃剂(IFR)是一种以氮、磷为主要组成的环保型阻燃剂，燃烧时烟雾少、放出的气体无害其且生成的炭层能防止熔滴，适合聚烯烃阻燃[1-5]。IFR分为磷氮类阻燃剂和可膨胀石墨两类，磷氮类阻燃剂又分为单体型和复配型两类。其中复配性的IFR已经商品化，得到了广泛的应用。使用IFR阻燃PP会大幅度降低其力学性能，特别是冲击性能[1,2]。聚丙烯分子链的侧甲基限制了链的旋转，韧性较低，阻燃剂的加入更限制了它的应用范围[6]。因此，有必要对PP材料阻燃的同时进行增韧改性以提高其性能。聚合物共混和复合能综合多种聚合物的优点，弥补阻燃剂对力学性能造成的破坏。为了实现聚丙烯的高性能化，本文选择乙烯辛烯共聚物(POE)作为PP的增韧剂，商业化复配型IFR作为PP的阻燃剂，选择PP-g-MAH与POE-g-MAH作为复合体系的增容剂以提高组分间的相容性。虽然目前针对聚丙烯阻燃的研究很多[3-9]，但是关于聚丙烯共混物阻燃的报道较少[10,11]；在复合体系中添加增容剂已经成为一种常规的做法，但是专门研究增容剂的种类对阻燃增韧共混复合体系综合性能影响的研究则较少。本文研究两种典型增容剂的添加对复合体系的阻燃性能及力学性能的影响。

1 实验方法

1.1 实验用原料

iPP，S1003，工业级；POE，Engage8150；POE-g-MAH，GR-216；PP-g-MAH，GPM200A；IFR，工业级，JLS-PNP1D；硅烷偶联剂，KH-161；二甲苯，分析纯。

1.2 样品制备

实验前使用牌号为KH-161的苯基三甲氧基硅烷偶联剂对IFR进行改性处理。硅烷偶联剂的用量为IFR总量的5‰(质量分数)。

按照表1中的组分配比，称取适量原料并混合均匀。将混合后的原料加入TSSJ-2S双螺杆挤出机中熔融挤出，挤出机从入料口至出料口各段温度依次为170℃、190℃、200℃和195℃，挤出速率为100 r/min。将挤出后的原料送入造粒机切碎，得到粒料。将制得的粒料在干燥条件下静置24 h以使体系中各组分达到稳定状态，然后将其加入高压注塑机中熔融注塑。选用不同的模具，得到极限氧指数、垂直燃烧及拉伸、冲击强度测试所需样条。高压注塑机的注射压力为40 MPa，温度205℃，保压时间8 s，冷却时间10 s；将干燥后的粒料在平板硫化机上于190℃、15 MPa下热压5 min，降温至120℃并保温10 min，得到样板，供锥形量热仪试验使用。

1.3 性能测试

燃烧性能测试 使用HC-2CZ型氧指数仪，参照GB/T 2406.2-2009《塑料用氧指数法测定燃烧行为-第二部分室温试验》测定材料的氧指数，测试样条的尺寸为80 mm×10 mm×4 mm，数量为10；使用UKS001型锥形量热仪测试材料的燃烧性能，实验中所用热辐射通量为35 kW/m^2，参考标准ASTME-1354，样板的尺寸为10 mm×10 mm×3 mm，每组3个样。

力学性能测试 使用INSTRON 3365万能材料试验机测试拉伸性能，测试方法ISO 0527-1BA，每组6个样；用XJC-250系列电子式悬简组合冲击试验机测试冲击性能，样条的尺寸为80 mm×10 mm×4 mm，在样条的一侧用RAY-RAN RR3700自动切缺口机洗出V型缺口，测试方法参照GB/T 1843-2008《塑料悬臂梁冲击试验方法》，每组6个样。测试温度为20℃。

微观形貌表征 使用JSM 6700F扫描电子显微镜，工作电压5 kV，电流10 μA。将冲击断面试样在30℃恒温条件下浸泡于二甲苯溶液中72 h，以刻蚀复合材料中的POE组分。

2 结果和讨论

2.1 燃烧性能

2.1.1 极限氧指数(LOI)与垂直燃烧性能 表1列出了纯iPP、iPP/POE材料、iPP/POE/IFR复合材料的组分配比、极限氧指数以及力学性能测试结果。由表1可知，纯iPP的LOI只有17.8，在空气中极易燃烧；与纯iPP相比，iPP/POE复合材料的LOI提高

到了20.0；添加IFR后iPP/POE/IFR复合材料的LOI则提升到了27.0，达到了难燃级别；添加增容剂后，复合材料的LOI进一步提高至28.8。

纯iPP的拉伸性能最高，达到了39.1 MPa，但其冲击强度较低，只有2.0 kJ/m²；与POE共混，可在基本保持材料拉伸强度的同时大幅提高其韧性。其原因是，POE与iPP相比分子中含有柔软卷曲的辛烯链条，材料受冲击后POE相区可以发生形变并吸收大量的冲击能，同时引发材料产生银纹，使材料的冲击强度的提高[1]；但是加入阻燃剂后材料的拉伸强度下降到了24.5 MPa，冲击强度由共混物的18.5 kJ/m²下降至4.6 kJ/m²；添加少量增容剂后IFR-c1的冲击强度比IFR-0上升43%，为6.6 kJ/m²；而IFR-c5的冲击强度则进一步提高到8.9 kJ/m²。复合材料的力学性能，主要受IFR颗粒在基体中分散的影响：IFR在共混过程中以固体状态存在，且与iPP基体的极性不同，与iPP的相容性较差，在iPP中容易发生团聚，且与iPP基体的结合力很低，两相间有空洞，导致复合材料的力学性能降低；增容剂的添加增强了两相间的结合力，减少了IFR的团聚及阻燃剂与基体间空洞的生成，同时减小了IFR颗粒的分散粒径，有利于力学性能的提高。

2.1.2 燃烧释热特性　表2给出了纯iPP及其复合材料的锥形量热实验结果。加入阻燃剂后，复合材料的引燃时间(TTI)都比iPP/POE有所提前；而热释放速率峰值(PHRR)和平均热释放速率(MHRR)都大幅降低；添加增容剂后，材料的热释放在IFR-0的基础上进一步减小。图1给出了热释放速率曲线图。由图1可知，纯iPP与iPP/POE燃烧过程的热释放速率(HRR)基本一致，二者燃烧过程迅速而猛烈，引燃后HRR迅速上升并到达640~660 kW/m²的峰值，之后HRR开始下降并熄灭，在HRR曲线图上燃烧过程为一个尖锐的峰。加入20%的IFR后，IFR-0的燃烧情况发生了很大的变化。整个燃烧过程可分为3个阶段，第一阶段为材料受热引燃，对应图中0~140 s阶段。与纯iPP及iPP/POE不同，在材料引燃

表1 iPP/POE/IFR复合材料配比、燃烧性能和力学性能

Table 1 Proportion and combustion properties tested by LOI and UL94 of iPP/POE/IFR composites

Sample	Mass fraction/%					LOI /%	Tensile strength /MPa	Impact strength /kJ·m⁻²
	iPP	POE	IFR	POE-g-MAH	PP-g-MAH			
iPP	100	0	0	0	0	17.8	39.1	2.0
iPP/POE	80	20	0	0	0	20.0	34.8	18.5
IFR-0	80	20	20	0	0	27.0	24.5	4.6
IFR-c1	80	19	20	1	0	28.8	27.5	6.6
IFR-c5	80	15	20	5	0	29.0	28.5	8.9
IFR-p1	79	20	20	0	1	28.8	25.1	5.1
IFR-p5	75	20	20	0	5	28.8	26.8	5.4

表2 iPP/POE/IFR/OMMT复合材料在35 kW/m²辐射通量下的锥形量热实验数据

Table 2 Cone calorimetric data of pure iPP and iPP/POE/IFR composites under a heat flux of 35 kW/m²

Sample	TTI (s)	PHRR (kW/m²)	MHRR (kW/m²)	MMLR (g/s)	av-EHC (MJ/kg)
iPP	69	643.1	345.2	0.07	39.4
iPP/POE	76	663.8	353.9	0.07	40.2
IFR-0	70	344.7	200.0	0.04	37.8
IFR-c1	72	316.0	177.4	0.03	40.2
IFR-c5	73	390.1	210.7	0.04	42.4
IFR-p1	58	240.6	152.9	0.03	38.5
IFR-p5	59	283.0	177.8	0.03	37.5

Note: TTI-time to ignition; PHRR-peak heat release rate; MHRR-mean heat release rate; MMLR-mean mass lose rate; av-EHC-average effective heat of combustion

的同时，IFR受热生成的炭层覆盖在材料表面，阻挡了热量和气体在材料表面的传递，HRR急剧上升，至150 kW/m²左右时上升速度放缓；第二阶段对应图中140~600 s阶段，材料的燃烧较为稳定，HRR基本保持变，因为炭层对材料用保护作用；第三阶段对应图中600~1000 s阶段，材料经过第二阶段的稳定燃烧过程后HRR再次上升，并在800 s左右达到峰值344.6 kW/m²后逐渐下降直至熄灭。这一阶段产生的原因，主要是燃烧后期炭层发生破裂，材料发生二次引燃，并形成HRR峰值，最终随着可燃物的耗尽，HRR逐渐降低，直至熄灭。

加入增容剂后阻燃增韧聚丙烯在锥形量热仪测试中的燃烧过程依然可分为三个阶段，即材料受热至熔融引燃阶段、炭层形成阶段及炭层破裂阶段。材料的最大峰值热释放速率，主要出现在燃烧的后半段中。当材料在辐射热作用下引燃后，阻燃剂发挥作用形成膨胀炭层。与iPP、iPP/POE曲线相比，其热释放速率的增长速率明显降低。但是，随着燃烧过程的继续进行材料表面的炭层发生破裂，HRR曲线随之再次上升并达到峰值。与IFR-0相比，IFR-c1与IFR-p1在燃烧的第三个阶段热释放速率显著降低，而前两个阶段之间的差别不明显。其原因是，在燃烧过程中生成的炭层结构更加均匀、致密，在燃烧的后期炭层不易破裂，对材料用更好的保护作用(图2和图3)。其中IFR-p1样品PHRR为240.6 kW/m²，相比iPP/POE、IFR-0以及IFR-c1分别下降了64%、30%和24%，而MHRR为152.9kW/m²，相比其他材料则分别下降57%，44%和14%，由此可见，增容剂PP-g-MAH的加入进一步降低了材料燃烧的危害性，其阻燃效果比添加POE-g-MAH更好。同时，从表2和图1可以看出，与添加1%的增容剂的复合材料相比，添加5%增容剂的复合材料的阻燃性能却有所降低，特别是IFR-c5，这可能与马来酸酐接枝物本身的热稳定性较差有关。

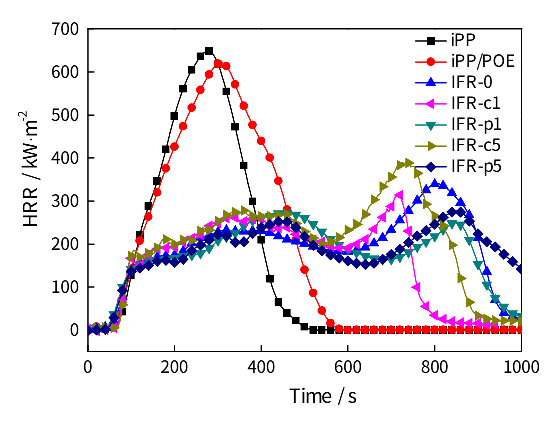


图1 iPP/POE/IFR复合材料在35 kW/m²辐射功率下的锥形量热试验热释放速率曲线

Fig.1 HRR (Heat Release Rate) curves for pure iPP and iPP/POE/IFR composite under a heat flux of 35 kW/m²

2.1.3 复合材料的生烟特性和烟毒性 为了评价材料在实际火灾中的危险性，需要评价其燃烧的烟气释放，主要包括材料燃烧过程中的烟释放总量(TSR)、平均CO产率(av-COY)、平均CO_2产率(av-CO_2Y)、平均比消光面积(av-SEA)、峰值CO产率(p-

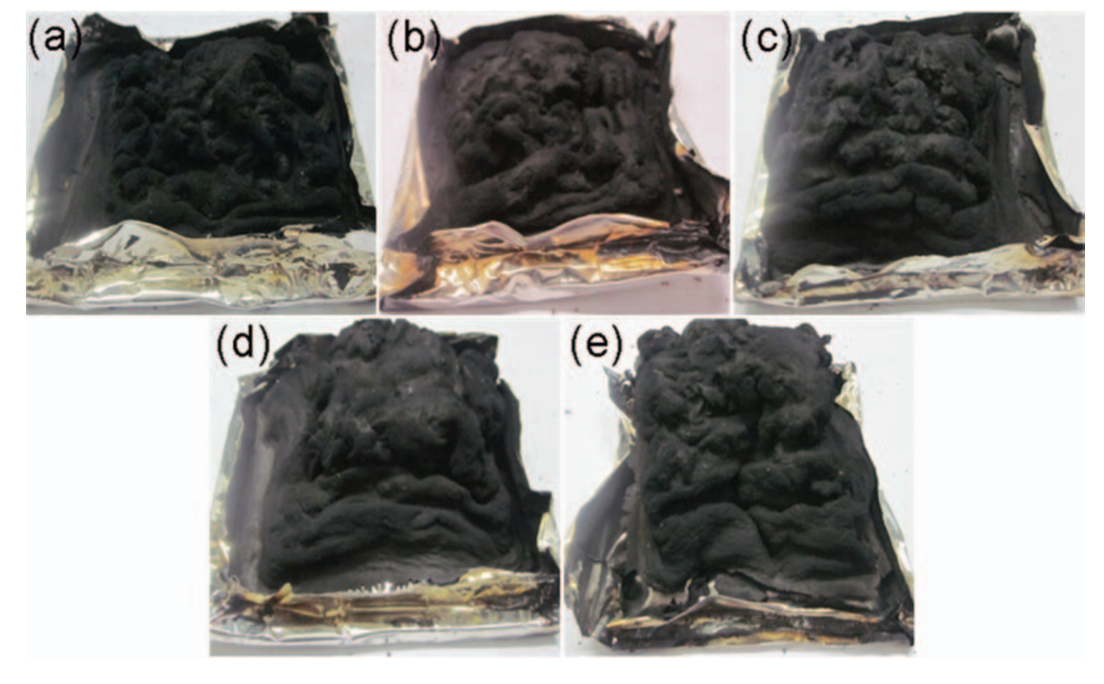
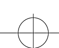


图2 锥型量热实验测试后的膨胀炭层形貌

Fig.2 Macroscopic morphologies of carbon layer after cone calorimetric test (a) IFR-0; (b) IFR-c1; (c) IFR-p1; (d) IFR-c5; (e) IFR-p5



COY)、峰值 CO_2 产率(p-CO_2Y)及峰值比消光面积(p-SEA)等。

表3给出了复合材料在锥形量热实验中的烟气释放相关数据。由表3可以看出，添加20%的IFR，阻燃材料在燃烧过程中的烟气释放量比iPP、iPP/POE有所增加，增容剂的加入一定程度上缓解了阻燃剂对材料烟气释放方面的负面影响，其中IFR-c1的TSR和av-SEA分别下降至1861.6 m^2/m^2 和551.9 m^2/kg，比IFR-0下降了21%和31%；而IFR-p1的TSR则降低到了1264.7 m^2/m^2，比纯iPP、iPP/POE、IFR-0、IFR-c1分别下降了36%、26%、46%和32%，av-SEA则分别下降了45%、48%、56%和36%，其烟气生成量及生成速率均明显降低。关于烟气中的有毒气体，加入IFR后CO产率没有显著的变化，而 CO_2 的产率则有了一定程度的降低。加入1%的增容剂使材料的av-CO_2Y、p-COY及p-CO_2Y在IFR-0的基础上进一步降低，从而进一步降低了材料的火灾危险性。而添加5%的增容剂未能明显改善复合材料的烟毒性，特别是IFR-c5还在一定程度上增加了烟气生成量。

2.2 膨胀炭层和复合材料的形貌

对膨胀炭层结构的观察分析，结果如图2和图3所示。图2给出了添加与未添加增容剂的膨胀阻燃增韧聚丙烯燃烧后残余炭层的宏观形貌。从图2可以看出，IFR-0燃烧后残余的炭层膨胀较小。炭层是不规则并且破碎的，表面呈现起伏结构，炭层的覆盖面积较少；而IFR-c1的炭层整体形貌保持了IFR-0的特征，但是与前者相比更加致密和连续。添加PP-g-MAH的复合材料炭层膨胀较为明显，残炭也更为均匀和致密(图2c和e)。

锥形量热试验中生成的炭层表面的微观结构，如图3所示。由图3可以看出，IFR-0并未形成连续而致密的膨胀炭层结构，添加一定量的增容剂后IFR-c1和IFR-c5材料的炭层则相对更为连续一些，

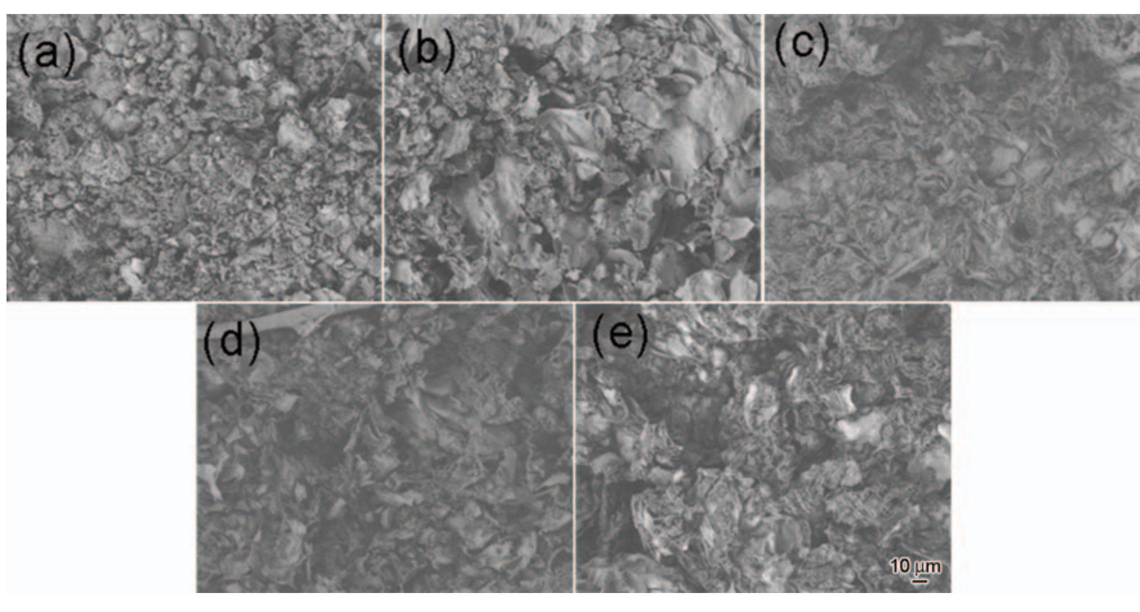


图3 锥型量热实验测试后的膨胀炭层微观形貌

Fig.3 SEM images of the residue after cone calorimetric test (a) IFR-0; (b) IFR-c1; (c) IFR-p1; (d) IFR-c5; (e) IFR-p5

表3 iPP/POE/IFR复合材料在35 kW/m^2 辐射功率下的锥形量热试验烟气数据

Table 3 Cone calorimetric smoke data of pure iPP and iPP/POE/IFR composite under a heat flux of 35 kW/m^2

Sample	TSR (m^2/m^2)	av-COY (kg/kg)	av-CO_2Y (kg/kg)	av-SEA (m^2/kg)	p-COY (kg/kg)	p-CO_2Y (kg/kg)	p-SEA (m^2/kg)
iPP	1965.7	0.03	2.76	442.3	0.12	11.2	4087.7
iPP/POE	1709.2	0.04	2.83	471.5	0.12	11.5	4257.3
IFR-0	2348.1	0.04	2.45	551.9	0.11	5.7	3934.6
IFR-c1	1861.6	0.03	2.18	380.7	0.09	5.2	3500.0
IFR-c5	2853.4	0.04	2.5	676.5	0.12	6.3	4285.1
IFR-p1	1264.7	0.04	2.22	244.6	0.08	4.3	1429.2
IFR-p5	2044.2	0.04	2.4	486.8	0.10	4.6	2582.0

但是比起IFR-c1，IFR-c5的炭层连续性有所降低；IFR-p1和IFR-p5的炭层连续而稳定，表面有较多的褶皱结构，里面含有许多能够容纳挥发性易燃气体的囊泡(图3c和e)。这种稳定而均匀的褶皱结构提高了其阻挡热量和气体的能力，对材料的保护效果更好，从而提高了材料的阻燃性能。

复合材料冲击断面的相结构，如图4所示。可以看出，POE相区被刻蚀后在iPP基体上形成的微小孔洞。由图4a和4a1可见，复合材料IFR-0中IFR在iPP基体中的分散极不均匀，且颗粒间存在团聚，

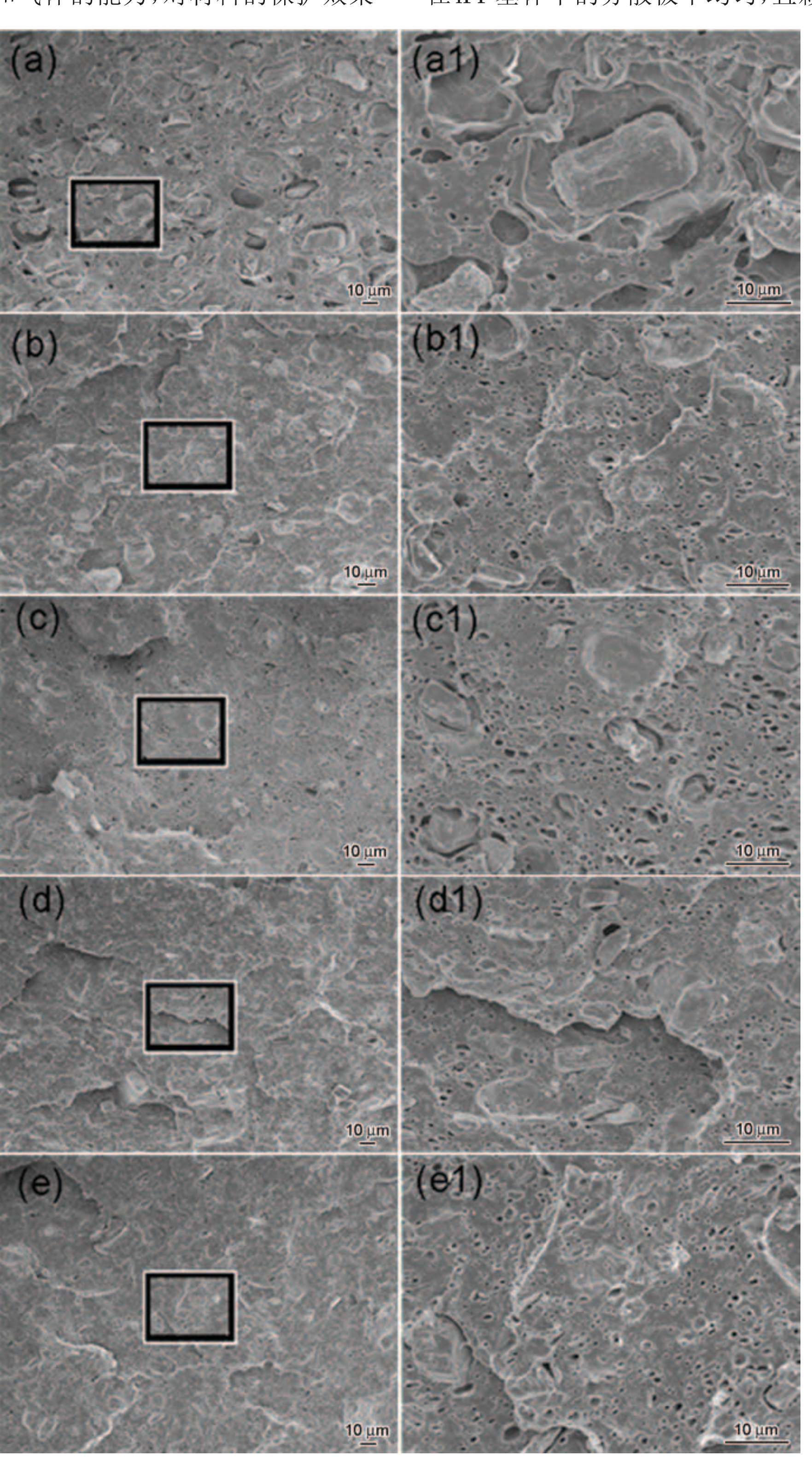
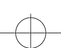


图4 复合材料冲击断面的微观形貌

Fig.4 SEM images of fractured surface after Izod impact tests (a) IFR-0; (b) IFR-c1; (c) IFR-p1; (d) IFR-c5; (e) IFR-p5. (a-e) lower magnification, (a1-e1) higher magnification



分散粒径较大，约为20~40 μm; 同时iPP与IFR颗粒间结合并不紧密，两者间存在空腔，可见IFR颗粒脱落后留下的空洞。这表明刚性IFR粒子的加入相当于在材料中引入了杂质，影响了材料受到冲击时对冲击能量的吸收，因此材料整体的力学性能下降较多。加入增容剂后，一方面POE相区的尺寸明显减小，同时IFR颗粒在基体中的分散情况也得到了显著的改善。如图4b~e所示：IFR颗粒的团聚现象减少，分散粒径减小。同时，随着增容剂含量增加至5%，IFR颗粒在iPP基体中呈现出完全或部分包覆状态，与基体间的结合力更加紧密，受冲击作用时两相间界面的位移、变形可以吸收部分冲击能量，使其韧性提高。同时，对比图4b和4c以及图4d和4e，一方面PP-g-MAH对IFR的均匀分散效果更为明显，使材料IFR-p1及IFR-p5燃烧时能形成更为均匀致密的炭层结构，从而提高阻燃性能，其阻燃效果优于IFR-0，而IFR颗粒为刚性粒子，受冲击时无法通过弹性形变缓冲、吸收冲击能，因此复合体系冲击强度的提高并不显著；另一方面，POE刻蚀后留下的孔洞结构(图4b、d)明显比图4c及4e少。这说明，POE-g-MAH作为韧性改性剂POE的相容剂，改变了POE的极性，使IFR倾向于分散在POE富集区，两者形成所谓的“核-壳”结构[12]，进一步提高材料的冲击韧性。可以看出，IFR颗粒更多地保留在冲击断面上，而在添加PP-g-MAH的复合材料中IFR大部分都在冲击下剥落，很好地解释了力学测试中POE-g-MAH对复合材料冲击韧性提高更加显著的结果。

3 结论

IFR能提高材料的阻燃性能，但是使增韧共混物的力学性能大幅降低；增容剂的加入使阻燃剂颗粒在聚合物基体中分散更均匀、分散粒径也减小、与基体间的结合力增加，在燃烧过程中生成的炭层更加连续而致密，从而减少了复合材料的热释放、烟气释放以及有毒气体产率，特别是热释放的峰值速率。更重要的是增容剂使阻燃增韧共混复合体系的力学性能得到很好的改善，弥补了IFR对复合材料的不良影响。PP-g-MAH使IFR在基体中分散更为均匀，燃烧后炭层表面有较多的褶皱结构，在保持力学性能的同时可大幅提高复合材料的阻燃性能，而POE-g-MAH使得MAH更多地被POE包覆，形成典型的“核-壳”结构，使材料的冲击韧性明显提高。

参 考 文 献

[1] Wang H, Jin J. Research progress of intumescent flame retardant polypropylene and its mechanical modification[J]. Polymer Bulletin, 2015, 7: 17
(王 昊, 金 静, 膨胀阻燃聚丙烯及其协同力学改性的研究进展[J]. 高分子通报, 2015, 7: 17)

[2] Dasari A, Yu Z Z, Cai G P, et al. Recent developments in the fire retardancy of polymeric materials[J]. Progress in Polymer Science, 2015, 38(9): 1357

[3] Camino G, Costa L, Martinasso G. Intumescent fire-retardant systems[J]. Polymer Degradation & Stability, 1989, 23(4): 359

[4] Enescu D, Frache A, Lavaselli M, et al. Novel phosphorous - nitrogen intumescent flame retardant system its effects on flame retardancy and thermal properties of polypropylene[J]. Polymer Degradation & Stability, 2013, 98(1): 297

[5] Lai X J, Qiu J D, Zeng X R, et al. Progress in phosphorus-nitrogen macromolecular intumescent flame retardants and their application in polypropylene [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2015, 9: 184
(赖学军, 邱杰东, 曾幸荣等. 磷-氮大分子膨胀型阻燃剂及其阻燃聚丙烯的研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 9: 184)

[6] Galli P, Vecellio G. Technology: driving force behind innovation and growth of polyolefins[J]. Progress in Polymer Science, 2011, 26 (8):1287

[7] Tang Y, Hu Y, Li B G, et al. Polypropylene/montmorillonite nanocomposites and intumescent, flame-retardant montmorillonite synergism in polypropylene nanocomposites[J]. Journal of Polymer Science Part A Polymer Chemistry, 2004, 42(23): 6163

[8] Tao S P, Lu Z Q, Xiao P, Research on the high performance of halogen free flame retardant PP[J]. China Plastics Industry, 2012, 40(3): 118
(陶四平, 陆湛泉, 肖 鹏. 无卤阻燃聚丙烯高性能化技术研究[J]. 塑料工业, 2012, 40(3): 118)

[9] Mi L, Wang N, Zhang J, et al. Synergistic effect of OMMT/mesoporous MCM- 41 on intumescent flame retardant polypropylene[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2012, 26(5): 456
(米 龙, 王 娜, 张 静等. 有机蒙脱土/介孔分子筛协同膨胀型阻燃剂阻燃聚丙烯的性能[J]. 材料研究学报, 2012, 26(5): 456

[10] Ren Q, Wan C, Zhang Y, et al. An investigation into synergistic effects of rare earth oxides on intumescent flame retardancy of polypropylene/poly (octylene-co-ethylene) blends[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2011, 22(10): 1414

[11] Qiao Z, Tai Q, Song L, et al. Synergistic effects of cerium phosphate and intumescent flame retardant on EPDM/PP composites [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2011, 22(12): 2602

[12] Su X Q, Qiao J L, Hua Y Q, et al. Study on the relationship between structure and properties for ternary PP nanocomposites with special “salami” like structure[J]. Acta Polymerica Sinica, 2005, 1: 142
(苏新清, 乔金樑, 华幼卿等. 具有包藏结构的三元聚丙烯纳米复合材料结构与性能关系的研究[J]. 高分子学报, 2005, 1: 142

（责任编辑:吴 岩）

